

泡沫塑料中的激波在固壁上的反射*

国相杰 李仲发 俞鸿儒

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

关键词 激波、气固两相流动、激波管

Keller^[1] 提出了利用泡沫塑料防护爆炸波对物体的破坏作用的设想。然而实践结果却与预期的相反。例如,穿上泡沫塑料背心的炮手被炮的爆炸波致伤的程度反而更加严重。Monti^[2] 将泡沫塑料当作均匀的二相介质并按含灰气体理论计算求出从空气中透射进入泡沫塑料中的激波,当其在固壁上反射时,反射激波后的压力峰值,远高于无泡沫塑料防护层时的反射激波后的压力。Gel'fand^[3], Gvozdeva^[4], Patz^[5], Weaver^[6] 等先后在激波管中进行了实验观察,证实了 Monti 所获得的结论。然而,所有的实验测得的泡沫中的激波在固壁上的反射压力峰值都较计算值低得多;此外,令人不解的问题是在所有已完成的实验中从未观察到具有间断前沿的激波。本工作针对这两个问题进行探求。

1 问题分析和实验

关于反射压力峰值低于理论预测值问题,可能由以下两种原因引起。一是泡沫塑料长度的影响。气固两相介质中的激波都具有一定长度的松弛区,如果泡沫塑料长度小于松弛区长度,则透射到泡沫塑料中的激波不能充分发展从而不能达到平衡区流动参数,可使固壁反射压力峰值低于预定值,只有泡沫塑料长度超过某个临界值后,实验测得值与理论值相比才有意义。另一个原因是泡沫塑料侧表面与激波管侧壁摩擦的影响。在含灰气体流动中,边壁摩擦影响只局限于边界层内,对边界层外的中心流区的影响可以忽略;而在泡沫塑料中边壁摩擦将通过固体框架立即传播到整个流场,边壁摩擦将降低泡沫塑料中入射激波和反射激波的强度。这一问题早已引起一些研究者的注意,他们采用泡沫塑料与激波管边壁预留约 1mm 间隙的措施企图消除或降低边壁摩擦的影响,实验证明这一措施是无效的。在我们的实验中采用在泡沫塑料侧表面涂润滑剂来降低边界摩擦影响。

含灰气体激波存在两种形态:当激波的传播速度大于气体声速时,激波阵面具有间断前沿;当激波的传播速度大于混合物的平衡声速而小于气体声速时,激波以无间断前沿的耗散激波的形态出现。在以往的实验中,由于激波在泡沫塑料中传播的速度低于泡沫塑料中的气体声速,未观察到具有间断前沿的激波,从含灰气体激波理论来看是正常的。至于泡沫塑料中的激波传播速度大于气体声速时,是否出现具有间断前沿的激波则有待于实验观察。为此,在实验中扩大了气体中入射激波马赫数范围,使得透射到泡沫塑料中的激波的传播速度包括了速度大于气体声速的强激波,以考察这种条件下泡沫塑料中能否出现具有间断前沿的激波。

实验是在 $\phi 80\text{mm}$ 激波管中进行的。空气中入射激波的马赫数范围 $1.10 \leq M_s \leq 7.16$ 。实验中使用的是聚氨酯乙炔泡沫塑料(PUR 软质泡沫塑料),直径与激波管内径相同,其密度为 $\rho_t = 25.4\text{kg/m}^3$ 。柱状泡沫塑料放在激波管尾部。图 1 可见:空气中入射激波 S_i (马赫

1992-11-01 收稿, 1992-12-30 收修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

数 M_s) 传播到空气/泡沫分界面时, 首先反射一道激波 S_r 回到空气中, 然后透射一道激波 S_t 进入泡沫塑料中, 透射激波 S_t 传播到激波管端壁时将反射一道反射激波 S_{tr} 。

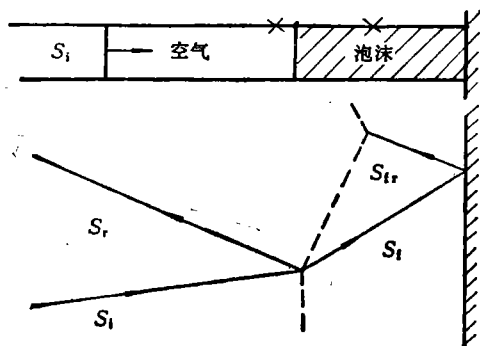


图 1 实验装置示意图与流动波图
×为测压点

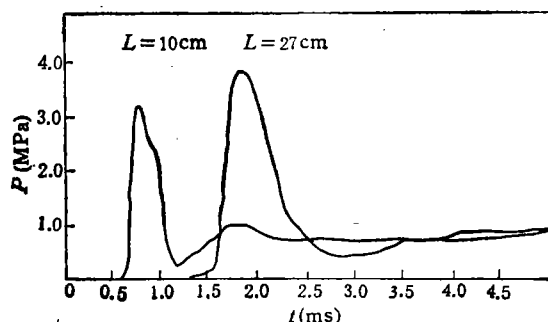


图 2 $M_s = 1.7$ 不同泡沫长度时, 固壁反射压力峰值曲线
纵坐标 P 为 1 MPa/格, 横坐标 t 为 500 μ s/格

2 结果与讨论

2.1 固壁反射压力峰值

(1) 泡沫塑料长度的影响。泡沫塑料中的激波在固体壁面反射时, 其反射激波的压力曲线形状与气体中激波的反射压力曲线形状不同, 曲线呈山峰状, 并且压力由峰值很快衰减, 压力峰值较纯气体时高出许多倍。反射压力峰值的大小与泡沫塑料的长度有关, 如图 2 所示, 当空气中入射激波的马赫数均为 $M_s = 1.7$ 时, 在泡沫塑料长度 $L = 10$ cm 时, 反射激波压力

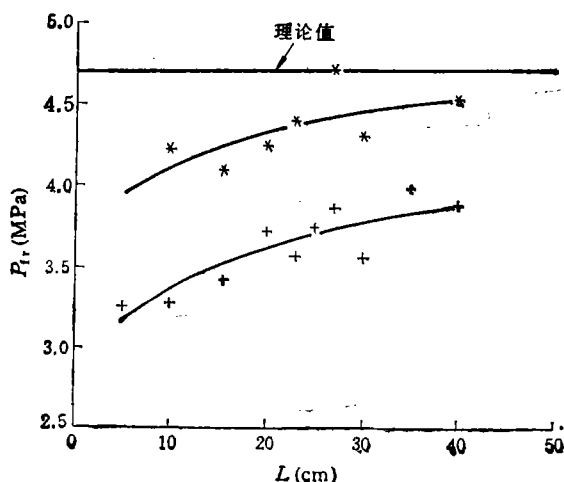


图 3 $M_s = 1.7$ 时, 固壁反射压力峰值的实验值与理论值
* 为涂滑石粉的实验值, + 为不涂滑石粉的实验值

峰值 $P_{tr} = 3.29$ MPa, 当泡沫塑料长度增加到 $L = 27$ cm 时, 反射激波的压力峰值增加到 $P_{tr} = 3.85$ MPa。可见长度对反射激波压力峰值有较大的影响。图 3 可以看出, 当泡沫塑料的长度小于某个临界长度 ($M_s = 1.7$ 时, 临界长度 $L = 27$ cm) 时, 反射激波压力峰值随泡沫长度的增加而增大, 当泡沫长度大于这个临界长度时, 固壁反射压力峰值趋近某个渐近值, 这个渐近值就是泡沫塑料中的激波达到平衡区时, 反射激波所应达到的压力峰值。

(2) 激波管边壁摩擦的影响。影响反射激波压力峰值大小的另一个因素是

激波管侧壁与泡沫塑料侧表面之间的摩擦力。为了消除或减小摩擦力的影响我们在柱状泡沫塑料侧表面涂润滑剂(石墨、滑石粉、二硫化钼), 滑石粉的减阻效果最好, 当空气中入射激波马赫数均为 $M_s = 1.7$, 泡沫塑料长度均为 $L = 27$ cm 时, 在泡沫塑料侧表面上不涂滑石粉时, 激波的固壁反射压力峰值只有 $P_{tr} = 3.85$ MPa, 而涂有滑石粉后, 激波的固壁反射压力峰值增加到 $P_{tr} = 4.70$ MPa, 可见, 侧壁摩擦的影响是不能忽略的。图 3 中可以看到: 当泡沫塑

料长度超过临界值以及消除侧壁摩擦影响后,按含灰气体激波理论预测的反射压力峰值与实验值非常接近。

2.2 泡沫塑料中的激波结构

按含灰气体激波理论,当空气中的入射激波马赫数 $M_s \geq 3.2$ 时,透射进入泡沫塑料中的激波的传播速度已大于气体声速 ($a = 340\text{m/s}$),但是,在图4中我们可以看见,当空气中的入射激波马赫数 $M_s = 3.82$ 和 $M_s = 7.16$ 时,泡沫塑料中的激波仍然没有出现间断前沿,只是激波上升前沿爬升的越来越陡而已。当 $M_s = 7.16$ 时,激波前沿上升时间还有 $\Delta t = 50\mu\text{s}$ 。实验表明,即便激波速度超过气体声速泡沫塑料中也不出现具有间断前沿的激波。这与泡沫塑料的结构有关。在含灰气体中,固体微粒悬浮在气体中,当激波阵面作用于含灰气体时,由于惯性,微粒只能逐渐加速,但气相介质的参数可以发生突变。只要激波传播速度大于气体声速就会形成间断前沿。

而泡沫塑料与含灰气体不同,气泡被包容在固体框架之中,当激波作用于泡沫塑料时,气体必须和框架一起运动,由于框架的惯性作用,气固两相介质都只能逐渐变化,因此不论激波速度小于或大于气体声速,都只能出现无间断前沿的耗散激波结构。这是泡沫塑料中的激波结构与含灰气体中的激波结构不同之处。在平衡区泡沫塑料中的激波与含灰气体中的激波特性相同;而在冻结区与松弛区,两者特性则不同。

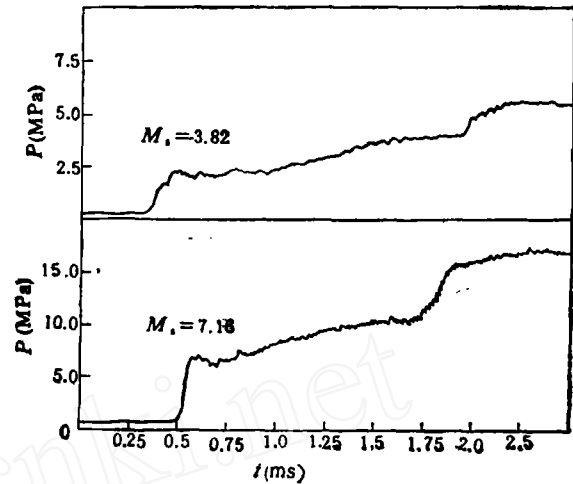


图4 泡沫塑料中的激波压力曲线

横坐标 t 为 $250\mu\text{s}$ /格

3 结 论

(1) 泡沫塑料中的激波在固体壁面上反射时,其反射压力峰值与泡沫塑料长度和激波管侧壁摩擦有关。若长度超过临界值以及妥善消除侧壁摩擦影响,则实验测量出的平衡压力值与按含灰气体激波理论预测值相符。由此可以推得:泡沫塑料中激波平衡区流动参数可以按含灰气体激波理论来处理。

(2) 含灰气体中,固体微粒自由悬浮在气体中;而在泡沫塑料中,气泡被包围在固体框架之中。当激波作用于前者,气固两相速度可以不同,而后者则必须相等。因此前者可出现间断前沿,后者只能以耗散激波形态出现。可以看出,在冻结区和松弛区,两者特性不同。

参 考 文 献

- [1] Keller, D. V., AD-636, 1966.
- [2] Monti, R., *Meccanica*, 1970, 4(5): 285.
- [3] Gel'fand, B. E. et al., *Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.*, 1975, 16(6): 74.
- [4] Gvozdeva, L. G. et al., in *Proc. 10th ICDERS*, 1985, 155.
- [5] Patz, G. et al., in *Proc. 15th ISSW*, 1985, 729.
- [6] Weaver, P. M. et al., in *Proc. 16th ISSW*, 1987, 363.